

## АНАЛИЗ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Д. С. Балыко

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научный руководитель В. В. Соленков

Известно [1], что в трансформаторах, электрических двигателях и генераторах, устройствах автоматики и вычислительной техники применяют магнитомягкие материалы, гистерезисные петли которых имеют малые площади, а основная кривая намагничивания – круто изменяющийся характер.

Некоторые из них (например, перминвар, сплавы 65НП, 68 НМП и др.) обладают петлей гистерезиса, близкой к прямоугольной (рис. 1, а).

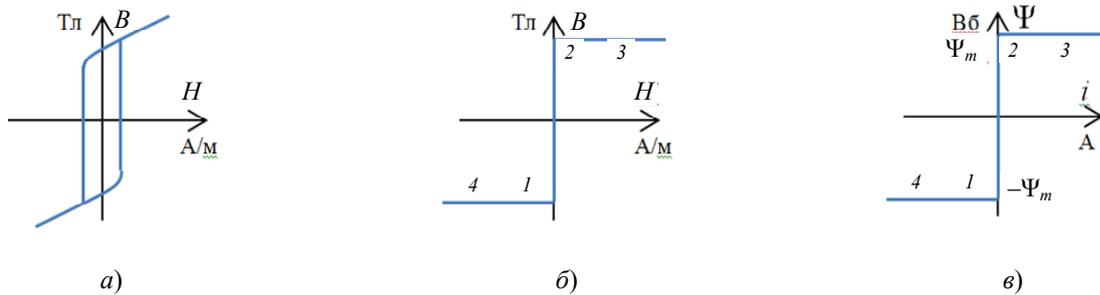


Рис. 1

Расчет электрических цепей переменного тока, содержащих индуктивные катушки с сердечниками из упомянутых выше материалов, обычно производят с помощью метода кусочно-линейной аппроксимации [1], [2]. При этом для облегчения расчета основную кривую намагничивания заменяют (аппроксимируют) идеальной прямоугольной (рис. 1, б): участки 4–1 и 2–3 параллельны оси абсцисс, а участок 1–2 – оси ординат.

При перемагничивании сердечника катушки (участок 1–2) изменяется только индукция  $B$ , а в намагниченном состоянии (участки 4–1 и 2–3) – только напряженность  $H$ .

Так как потокосцепление  $\Psi$  пропорционально индукции  $B$  в сердечнике ( $\Psi = wsB$ , где  $w$  – число витков катушки;  $s$  – сечение сердечника), а ток  $i$  – напряженности  $H$  магнитного поля (по закону полного тока  $i = \frac{l}{w} H$ , где  $l$  – длина средней силовой линии поля в сердечнике), то вебер-амперная характеристика индуктивной катушки качественно повторит основную кривую намагничивания  $B(H)$  (рис. 1, в).

Пример расчета цепи, с последовательным соединением линейного сопротивления  $R$  и нелинейной индуктивной катушки (рис. 2) достаточно подробно рассмотрен в [1]. Поэтому ниже приведем лишь основные расчетные соотношения.

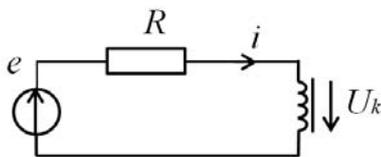


Рис. 2

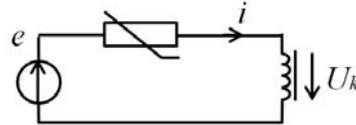


Рис. 3

Дифференциальное уравнение, описывающее режим работы цепи, имеет вид

$$u_k + u_R = \frac{d\psi}{dt} + Ri = E_m \sin \omega t \quad (1)$$

и является нелинейным (так как вебер-амперная характеристика  $\Psi(i)$  нелинейная). На участке от  $\omega t = 0$  до  $\omega t = \omega t_1$  (рис. 5) ток  $i = 0$ , напряжение на катушке  $u_k = e = E_m \sin \omega t$ , а потокосцепление изменяется от  $-\psi_m$  до  $\psi_m$  (катушка перемагничивается). Так как

$$\frac{d\psi}{dt} = E_m \sin \omega t ; \quad (2)$$

$$\psi = -\frac{E_m}{\omega} \cos \omega t + \frac{E_m}{\omega} - \psi_m . \quad (3)$$

В интервале от  $\omega t = \omega t_1$  до  $\omega t = \pi$  нелинейная катушка находится в намагниченном состоянии и  $u_k = \frac{d\psi_m}{dt} = 0$ . Следовательно

$$Ri = E_m \sin \omega t ; \quad (4)$$

$$i = \frac{E_m}{R} \sin \omega t . \quad (5)$$

Для определения  $\omega t_1$  воспользуемся уравнением (3), учтя, что при  $\omega t = \omega t_1$   $\psi = \psi_m$ :

$$\psi_m = -\frac{E_m}{\omega} \cos \omega t_1 + \frac{E_m}{\omega} - \psi_m \text{ и} \quad (6)$$

$$\omega t_1 = \arccos\left(1 - \frac{2\psi_m \omega}{E_m}\right). \quad (7)$$

Зависимости  $e(\omega t)$ ,  $\psi(\omega t)$ ,  $u_k(\omega t)$  и  $i(\omega t)$  для случая  $e = 90 \cdot \sin 4000t$ ;  $R = 100$  Ом и  $\psi_m = 0,02$  Вб приведены на рис. 5. Выражение (7) показывает, что время перемагничивания катушки зависит от трех величин:  $\psi_m$ ,  $E_m$  и  $\omega$ .

- При уменьшении  $\omega$  время перемагничивания катушки увеличивается.
- При изменении  $\psi_m$  и  $E_m$  может возникнуть ситуация, когда за половину периода ЭДС катушка не успевает перемагничиваться и ток  $i = 0$  в течение всего периода ЭДС  $e$ .

В схеме рис. 3 последовательно с нелинейной индуктивной катушкой включен нелинейный резистор, вольт-амперная характеристика которого приведена на рис. 4.

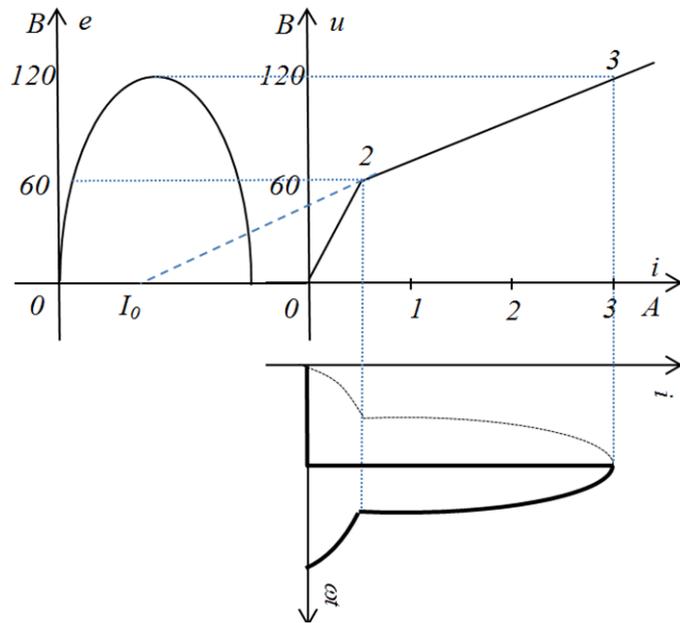


Рис. 4

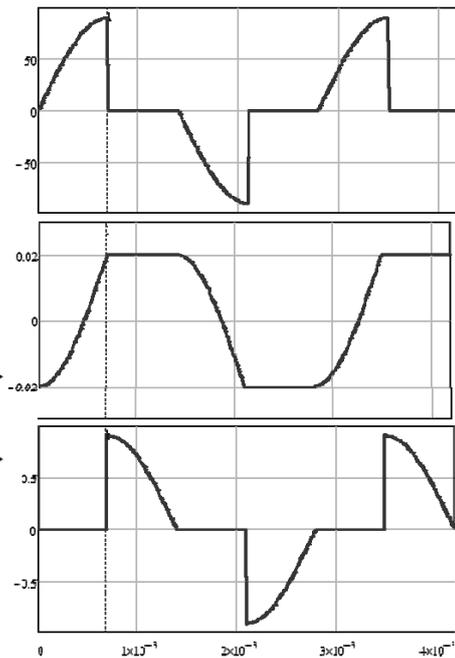


Рис. 5

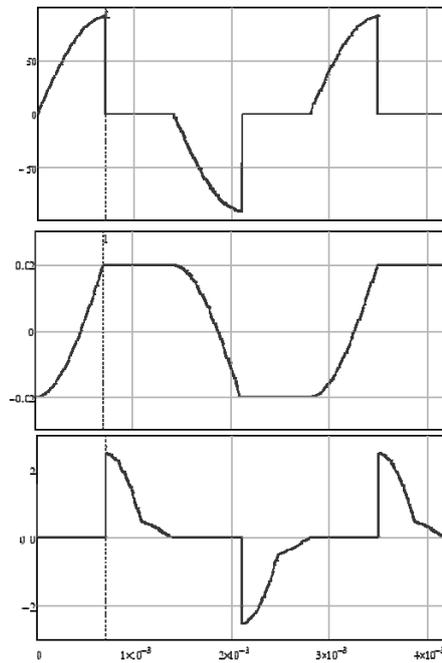


Рис. 6

Несмотря на наличие нелинейного сопротивления, останутся справедливыми выражения (2), (3), (6) и (7), характеризующие процесс перемагничивания катушки. Что касается кривой тока, то она может быть определена как графически, так и аналитически.

В последнем случае необходимо определить динамическое сопротивление на каждом из линейных участков вольт-амперной характеристики и записать выражение для  $i(\omega t)$ .

Пока, не учитывая наличие нелинейной индуктивности, можно записать:

- Участок 0–2. При  $0 \leq i \leq i_1 : r_{д1} = \frac{\Delta u_1}{\Delta i_1} \Rightarrow i(\omega t) = \frac{e}{r_{д1}} = \frac{E_m}{r_{д1}} \sin \omega t$ .

- Участок 2–3. При  $i \geq i_1 : r_{д2} = \frac{\Delta u_2}{\Delta i_2} \Rightarrow i(\omega t) = \frac{e}{r_{д2}} - I_0$ .

В точке излома 2 значение токов «припасовывается», т. е. значения тока, полученные по (8) и (9), должны быть одинаковые.

#### Литература

1. Бессонов, Л. А. ТОЭ. Электрические цепи : учеб. для электротехн., энергет. специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд. – М. : Высш. шк, 1996. – 638 с.
2. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – М. : Энергия, 1989. – 527 с.